

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN EN  
UNA CUENCA ANDINA CHILENA USANDO EL MODELO HIDROLÓGICO  
TETIS**

**SEBASTIÁN CONTRERAS<sup>1,2</sup>**  
**LINA CASTRO<sup>1,2</sup>**  
**TOMAS BOLAÑO-ORTIZ<sup>1</sup>**  
**FLORENCIA RUGGERI<sup>1</sup>**  
**XIMENA FADIC<sup>1</sup>**  
**TAMARA GORENA HERNÁNDEZ<sup>1</sup>**  
**VÍCTOR VIDAL<sup>1,3</sup>**  
**RAÚL FLORES<sup>1,2</sup>**  
**FRANCISCO CERECEDA-BALIC<sup>1,3</sup>**

**RESUMEN**

El presente trabajo propone la modelación de la esorrentía a escala diaria de una cuenca andina, junto con una evaluación del efecto de la variabilidad espacial de la precipitación mediante la determinación de parámetros de momento espacial de tormentas. Para ello se emplea el modelo hidrológico distribuido conceptual TETIS, además de la utilización del nuevo conjunto de datos climatológicos CR2MET como series de entrada. La calibración tiene como objetivo ajustar el modelo hidrológico a las funciones objetivo que relacionan caudal observado vs simulado, y luego una evaluación de la eficiencia para SCA con los resultados obtenidos. Los resultados de la modelación hidrológica muestran un valor de la función objetivo KGE igual a 0.78 para caudal, junto con KGE igual a 0.56 para cobertura de nieve SCA en el período de calibración; mientras que en el período de validación se obtiene un KGE igual a 0.56 para caudal, junto con un KGE de 0.31 para cobertura de nieve SCA. En cuanto a la evaluación espacial de las tormentas, los resultados muestran que: (i) las tormentas ubicadas ligeramente aguas arriba del centroide de la cuenca, y con una leve distribución unimodal, conducen a los caudales peak más altos del período; mientras que (ii) las tormentas de mayor frecuencia tienden a adoptar una distribución espacial uniforme, y a ubicarse en el centroide de la cuenca.

---

<sup>1</sup> Centro de Tecnologías Ambientales (CETAM), Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile

<sup>2</sup> Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile

<sup>3</sup> Departamento de Química, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile

## 1. INTRODUCCIÓN

Un desafío que existe en ingeniería civil es el modelamiento de la respuesta hidrológica de un sistema mediante el uso de modelos hidrológicos que se ajusten lo mejor posible a los registros observados. En este contexto, los modelos hidrológicos distribuidos conceptuales permiten una representación de la variabilidad espacial y temporal de las forzantes meteorológicas y de las características de la cuenca, además de incluir procesos físicos importantes en cuencas andinas, como es el caso de la fusión de nieve. Dicho proceso es de importancia para la modelación, puesto que el derretimiento de nieve puede aportar un caudal considerable a la esorrentía total de la cuenca (GIHMA, 2020).

Una de las problemáticas en la modelación hidrológica es la influencia de la variabilidad espacial de las tormentas y su impacto en la esorrentía resultante. No obstante, pese a que hay estudios que muestran que la incertidumbre espacial de las tormentas en la predicción de la esorrentía depende de factores como su organización espacial, como también del sistema de transporte propio de cada cuenca (Zocatelli et al., 2010), no se han efectuado estudios que lo evalúen de manera precisa en cuencas chilenas.

Considerando el problema que involucra la incertidumbre espacial de las tormentas y su influencia en la esorrentía resultante, el trabajo presenta una modelación hidrológica y posterior evaluación de la incertidumbre en la cuenca del Río Colorado, ubicado en la Región Metropolitana. En primer lugar, se elabora una metodología para la obtención y tratamiento de la información de entrada del modelo hidrológico. Las series climatológicas de entrada corresponden al nuevo conjunto de datos CR2MET que incluyen precipitación y temperaturas extremas. Posteriormente, se efectúa la modelación hidrológica usando el modelo TETIS para el período 2008-2018, calibrando el modelo con funciones objetivo que incluyen esorrentía, junto con una evaluación de la eficiencia de cobertura de nieve (SCA) con los resultados obtenidos. En último lugar, se evalúa la incertidumbre espacial de tormentas mediante el cálculo de parámetros de momento (Zocatelli et al., 2011), que describen la organización espacial de las precipitaciones, con el fin de estudiar su comportamiento para distintos *eventos de tormentas de alto impacto* en la zona de estudio.

## 2. MARCO TEÓRICO

El modelo hidrológico de tipo distribuido TETIS consiste en un modelo de lluvia-esorrentía que se desarrolló por el Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental (GIHMA) perteneciente a la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) a través del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA). Este modelo realiza una discretización del espacio en celdas regulares que contienen información de parámetros físicos y que simulan el entorno de modelación. Se desarrolla con el propósito de simular el ciclo hidrológico en cuencas naturales, obteniendo una respuesta ocasionada por la precipitación en forma de lluvia o nieve (GIHMA, 2020).

Los parámetros de momento espaciales de precipitación proveen una descripción de la organización espacial de la precipitación para un evento de tormenta de duración  $T_s$ , que se define de acuerdo a la ecuación (1) (Zocatelli et al., 2011):

$$P_n(t) = |A|^{-1} \int r_t(x, y) d(x, y)^n dA = \frac{1}{T_s} \int p_n(t) dt \quad (1)$$

Además es necesario determinar el momento de la distancia de flujo  $g_n$  de orden  $n$ , que se expresa en la ecuación (2). Notar que la expresión de orden  $n = 0$  adopta un valor unitario (Zocatelli et al., 2011).

$$g_n(t) = |A|^{-1} \int d(x, y)^n dA \quad (2)$$

Una vez determinadas las expresiones anteriores, los parámetros de momento espacial de tormentas se obtienen de acuerdo a la ecuación (3) y ecuación (4) (Zocatelli et al., 2011):

$$\Delta_1 = \frac{P_1}{P_0 g_1} \quad (3)$$

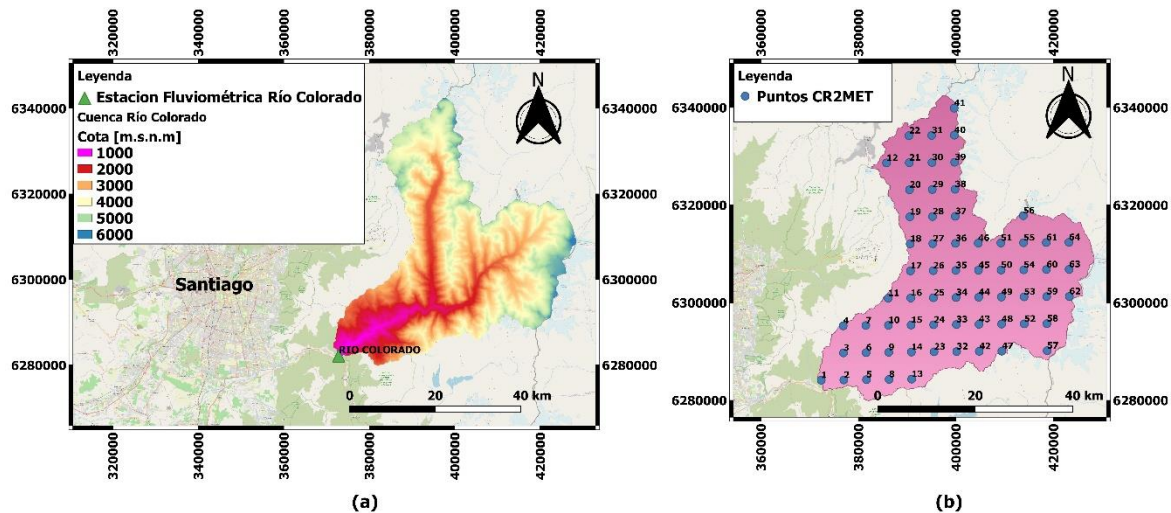
$$\Delta_2 = \frac{1}{g_2 - g_1^2} \left[ \frac{P_2}{P_0} - \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^2 \right] \quad (4)$$

El parámetro  $\Delta_1$  describe la distancia del centroide de la precipitación respecto del centroide de la cuenca: los valores cercanos a 1 reflejan una distribución de precipitación concentrada y cercana a la posición del centroide de la cuenca; los valores menores a 1 indican que la precipitación se encuentra distribuida en una zona cercana al punto de salida de la cuenca; y por último valores mayores a 1 indican que la distribución de la tormenta se encuentra en la parte alta de la cuenca. En cambio, el parámetro  $\Delta_2$  determina la dispersión de las distancias de flujo de la tormenta ponderadas en torno a su valor medio con respecto a la dispersión de las distancias de flujo, y que indica la concentración de la tormenta sobre la cuenca: los valores cercanos a 1 reflejan una distribución uniforme de la precipitación; los valores menores a 1 indican que la precipitación se concentra en un área menor al área de la cuenca (distribución unimodal); y los valores mayores a 1 corresponden a casos de tormentas multimodales (Douinot et al., 2016).

### 3. ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del “Río Colorado” se encuentra ubicada en la comuna de San José de Maipo perteneciente a la Región Metropolitana de Chile, delimitada por el lado este por la Cordillera de Los Andes (frontera natural con Argentina), mientras que por el lado oeste se encuentra a 30 kilómetros de distancia de Santiago. La cuenca es definida a partir de la estación “Río Colorado antes junta río Maipo”, o denominada en forma abreviada “Río Colorado”. Dicha estación se ubica a la salida de la cuenca de estudio (ver Figura 1-a).

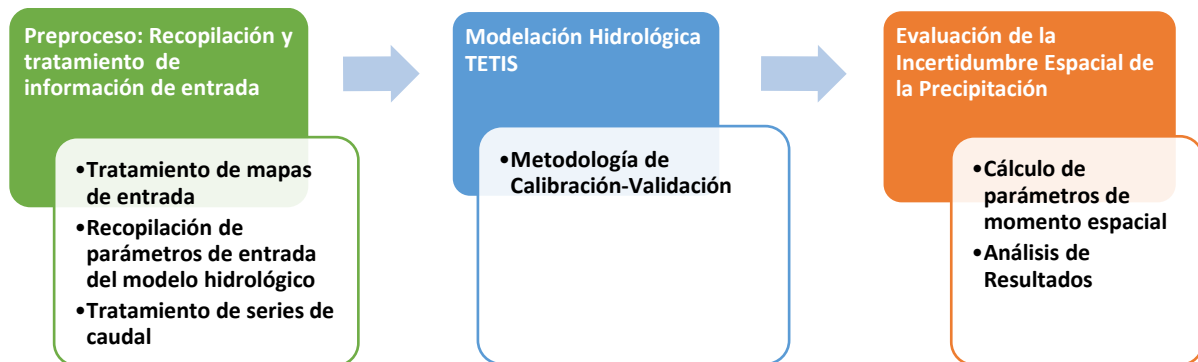
A partir de la base de datos CR2MET (versión 1979-2018) generada por el Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR2)<sup>2</sup> (DGA, 2017), se obtienen un total de 64 puntos que proveen las variables de precipitación y temperaturas medias a escala diaria para el período 2008-2018. Cabe señalar que dichos puntos se encuentran dentro del contorno de la cuenca de estudio (ver Figura 1-b).



**Figura 1-a.-** (a) Mapa de Localización de la cuenca del Río Colorado. Datum WGS84 - Zona 19S  
**Figura 1-b.-** Puntos CR2MET en cuenca Río Colorado. Datum WGS84 - Zona 19S

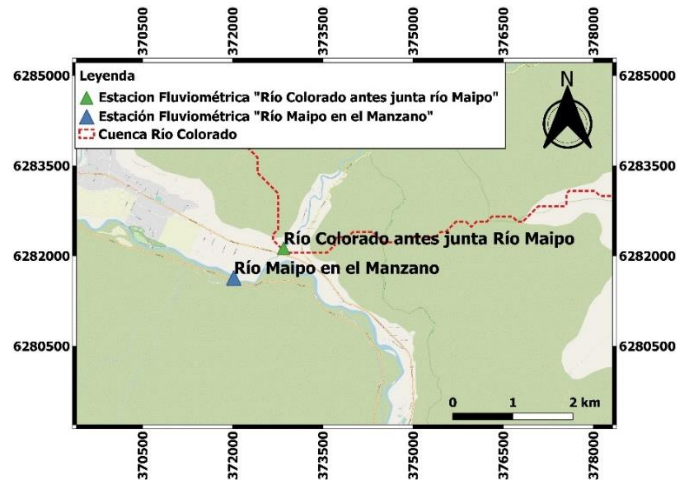
#### 4. METODOLOGÍA

La metodología de trabajo consta de tres macro-actividades (ver Figura 2): *Preproceso*, que contempla la recopilación y tratamiento de la información de entrada del modelo hidrológico, que incluye: tratamiento de mapas de entrada, recopilación de parámetros de entrada del modelo, y por último el tratamiento de series de caudales; *Modelación Hidrológica*, en donde se emplean los datos de entrada para efectuar la calibración-validación del modelo hidrológico, y además realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros; y la *Evaluación de la Incertidumbre Espacial de la Precipitación*, que ocupa la información de entrada para calcular los parámetros de momentos espaciales (Zocatelli et al., 2011) a escala diaria para la cuenca de estudio, finalizando con un análisis de los resultados en el período de estudio.



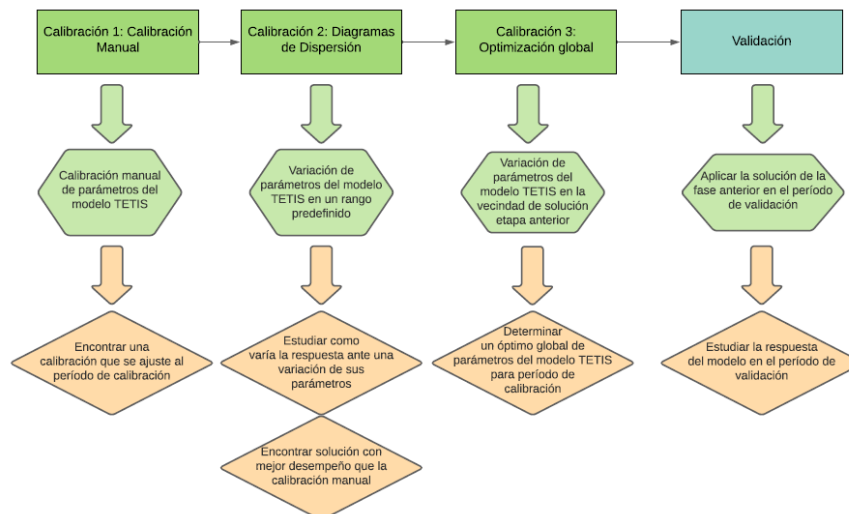
**Figura 2.-** Esquema Metodológico

En la macro-actividad de *Preproceso*, para el tratamiento de las series de caudal en la estación fluviométrica “Río Colorado antes junta Río Maipo”, se rellenaron los datos faltantes usando la información de la estación “Río Maipo en el Manzano” (ver Figura 3).



**Figura 3.-** Ubicación de estaciones fluviométricas. Datum WGS84 - Zona 19S

En la macro-actividad de *Modelación Hidrológica* se propone una metodología de calibración-validación que se esquematiza en la Figura 4. Primero, se realiza una modelación con los parámetros por defecto (valores iniciales). Segundo, en la Etapa 1 se efectúa una calibración manual, en donde se variaron uno por uno todos los parámetros hasta lograr una mejora en la eficiencia del modelo. Tercero, en la Etapa 2 se utiliza el algoritmo SCE-UA de calibración automática que incorpora TETIS (GIHMA, 2020) para realizar un total de 500 simulaciones hidrológicas (se usa el índice KGE como función objetivo de calibración) con el objeto de elaborar diagramas de dispersión, y de esta manera vislumbrar el comportamiento de cada parámetro vs el índice NSE. Cuarto, en la Etapa 3 se emplean los resultados de las etapas anteriores, en donde se efectúa un total de 200 simulaciones hidrológicas adicionales con el algoritmo SCE-UA (se emplea el índice KGE como función objetivo de calibración), variando los parámetros en un rango más acotado que en las etapas anteriores, asegurando que la solución sea encontrada en un tiempo computacional menor. Por último, en la Etapa 4 se realiza la modelación en el período de validación (2015-2018) con los parámetros calibrados.

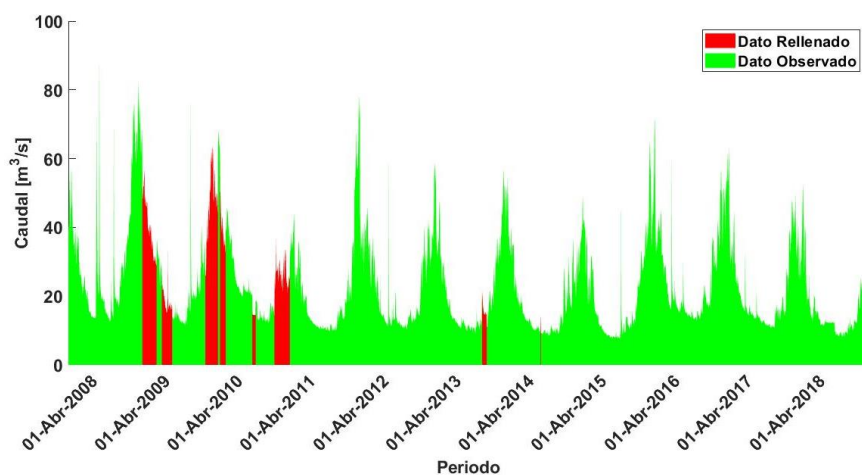


**Figura 4.-** Metodología propuesta para calibración-validación

## 5. RESULTADOS

Los resultados del tratamiento de mapas de entrada del modelo TETIS se diferencian según las fuentes empleadas para su obtención. Primero, los mapas obtenidos a partir del MED (Modelo de Elevación Digital) emplearon como base las imágenes satelitales SRTM de la NASA (Jarvis et al., 2008). Segundo, los mapas obtenidos a partir del Land Cover Chile 2014 (Zhao et al., 2016) que entrega información sobre la cobertura vegetal en la zona de estudio. Tercero, la fuente SOTERLAC (Fuente: *Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean*) que provee información sobre las clases de suelos y sus propiedades vinculadas (Batjes, 2005). Por último, los mapas Multi-Origen, que fueron obtenidos a partir de las fuentes previamente señaladas.

Los datos de caudal medio diario de la estación “Río Colorado antes Río Maipo” fueron obtenidos luego de rellenar de acuerdo a los métodos de interpolación *Transposición de Caudales Medios*, *Método de Regresión Lineal* y *Método de Correlación Ortogonal*, y tomando como referencia la estación patrón “Río Maipo en el Manzano”. Para la comparación de los métodos y seleccionar el que presente el mínimo error, se determinaron los índices RMSE y EAM. Los resultados muestran que el método de *Regresión Lineal* presentó el mínimo error, con un valor de RMSE igual a  $6.31 \text{ m}^3/\text{s}$  y un valor de EAM igual a  $4.17 \text{ m}^3/\text{s}$ . En la Figura 5 se muestran los datos de caudal medio diario utilizados en la modelación hidrológica.



**Figura 5.-** Datos de Caudal Medio Diario utilizados en la modelación hidrológica – Estación Río Colorado antes junta río Maipo

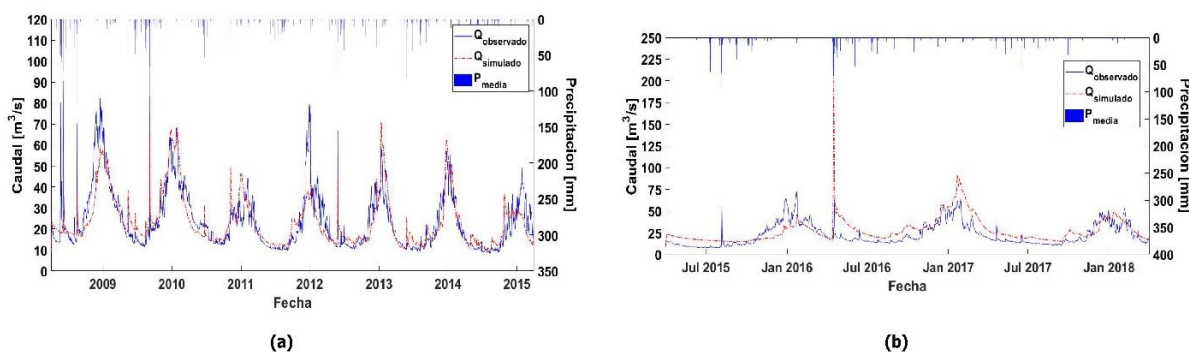
En la Tabla 1 se muestran los resultados de las modelaciones hidrológicas efectuadas. La modelación con los parámetros por defecto (valores iniciales) presenta una baja producción de escorrentía, con un volumen simulado un 49% menor al observado; asimismo las funciones objetivo muestran que: la componente  $r$  refleja una deficiente correlación lineal igual a 0.13, junto con un valor de  $\beta$  que indica un sesgo igual a 0.51. La modelación de la Etapa 1 muestra una mejora respecto de la modelación anterior: la producción de escorrentía simulada es un 0.7% mayor a la observada; y las funciones objetivo NSE y KGE muestran

cambios importantes: la componente  $r$  muestra un mejor ajuste de correlación lineal, un coeficiente  $\alpha$  que muestra una variabilidad ligeramente mayor en los datos observados, y un valor de  $\beta$  que refleja que no hay sesgo (valor óptimo). La modelación de la Etapa 3 igualmente muestra mejoras respecto de la Etapa 1: la producción de escorrentía simulada es un 1.0% menor a la observada; mientras que las funciones objetivo muestran mejorías: la componente  $r$  refleja una fuerte correlación lineal, un coeficiente  $\alpha$  que muestra una variabilidad ligeramente mayor en los datos observados, y un valor de  $\beta$  que indica que no hay sesgo (valor óptimo). Por último, la modelación de la Etapa 4 muestra una sobreestimación en la producción de escorrentía, con una producción de escorrentía simulada un 23.1% mayor a la observada; asimismo las funciones objetivo reflejan una degradación: la componente  $r$  muestra una correlación lineal medianamente aceptable, un valor de  $\alpha$  que indica una variabilidad mayor en los datos simulados, y por último un valor de  $\beta$  que muestra un sesgo de 23%.

**Tabla 1.- Resumen Desempeño Caudal Observado vs Simulado**

Modelación	%Error Volumen	NSE	$r$	$\alpha$	$\beta$	KGE
Valores iniciales	-49.2%	-1.15	0.13	0.82	0.51	-0.01
Etapa 1	+0.7%	0.61	0.78	0.84	1.00	0.73
Etapa 3	-1.0%	0.67	0.82	0.88	0.99	0.78
Etapa 4 (Validación)	+23.08%	0.01	0.65	1.14	1.23	0.56

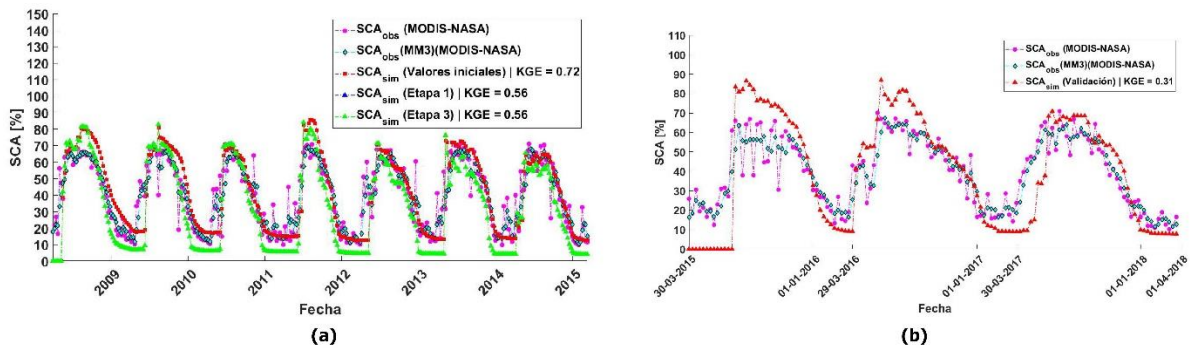
En la Figura 6-a y Figura 6-b se muestran las gráficas con los hidrogramas resultantes simulado vs observado para el período de calibración y validación, respectivamente. En el período de calibración se observa una similitud entre los hidrogramas, que es evidente en los años 2010-2013-2014, pero con una subestimación del caudal simulado en los años 2009-2012-2015 durante el período estival. Además, se presentan caudales peak simulados menores a los observados en eventos de tormentas de alta magnitud. En el período de validación se observa que el hidrograma simulado se encuentra por sobre el observado durante la mayor parte del período (notar año 2017 en la Figura 6-b). Asimismo, en los eventos de precipitación el modelo hidrológico no responde con peaks locales de caudal, a excepción del año 2016, donde el modelo responde con un caudal peak simulado que sobreestima en gran medida el caudal observado en la cuenca.



**Figura 6-a.-** Hidrograma resultante – modelación hidrológica – período de calibración  
**Figura 6-b.-** Hidrograma resultante – modelación hidrológica – período de validación



En la Figura 7-a y Figura 7-b se muestran las series de cobertura nival. Las series SCA observadas fueron determinadas a partir de imágenes satelitales (Hall & Riggs, 2021), y luego se determinó un suavizado de los datos con media móvil de 3 períodos consecutivos (denominado MM3 en las gráficas) para el cálculo de las funciones objetivo. Por su parte, las series SCA simuladas se determinaron a partir de los mapas de acumulación de nieve que entrega como resultado el modelo TETIS.



**Figura 7-a.-** Series SCA observada vs simulada – período de calibración 2008-2015

**Figura 7-b.-** Series SCA observada vs simulada – período de validación 2015-2018

Los resultados obtenidos de desempeño en cobertura de nieve SCA se resumen en la Tabla 2. La modelación con los parámetros por defecto (valores iniciales) presenta el mejor desempeño (notar similitud en la Figura 7-a), lo que se refleja tanto en los índices de eficiencia como en las componentes del índice KGE: el valor de  $r$  refleja una fuerte correlación lineal; el coeficiente  $\alpha$  refleja una variabilidad mayor en los datos simulados; y un valor de  $\beta$  que indica un sesgo prácticamente nulo. Las modelaciones de la Etapa 1 y Etapa 3 presentan el mismo desempeño (advertir que las gráficas se traslapan en la Figura 7-a), que empeora respecto de la modelación con los parámetros por defecto, lo que se refleja tanto en los índices de eficiencia obtenidos como en las componentes del índice KGE: el coeficiente  $\alpha$  indica un aumento en la variabilidad de los datos simulados vs observados, junto con un valor de  $\beta$  que indica un aumento en el sesgo de la modelación. Por último, la modelación de la Etapa 4 (Validación) presenta el peor desempeño (advertir diferencias en la Figura 7-b), que se evidencia tanto en los índices de eficiencia como en las componentes del índice KGE: el coeficiente  $\alpha$  refleja una alta variabilidad en los datos simulados vs observados, mientras que las componentes  $r$ - $\beta$  arrojan buenos resultados.

**Tabla 2.-** Resumen Desempeño SCA Observado vs Simulado

Modelación	NSE	$r$	$\alpha$	$\beta$	KGE
Valores Iniciales	0.71	0.91	1.27	1.03	0.72
Etapa 1	0.44	0.91	1.39	0.81	0.56
Etapa 3	0.44	0.91	1.39	0.81	0.56
Etapa 4 (Validación)	0.21	0.91	1.69	1.01	0.31

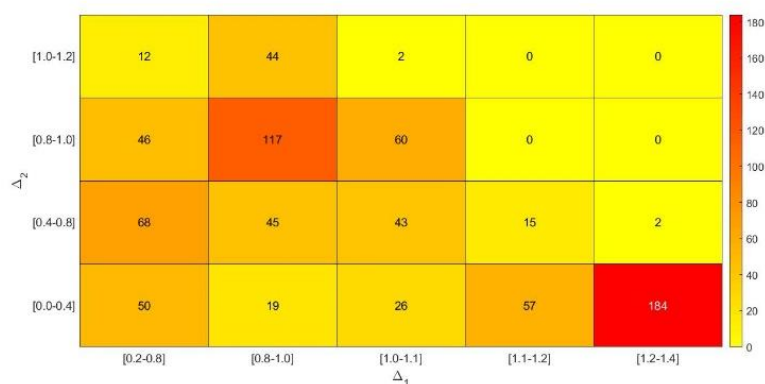
La evaluación de la incertidumbre espacial de la precipitación determinó los parámetros de momento espacial  $\Delta_1$ - $\Delta_2$  para un total de 922 eventos de tormentas ocurridas en el período de calibración-validación (01-04-2008 al 01-04-2018). En particular, se analizaron aquellas



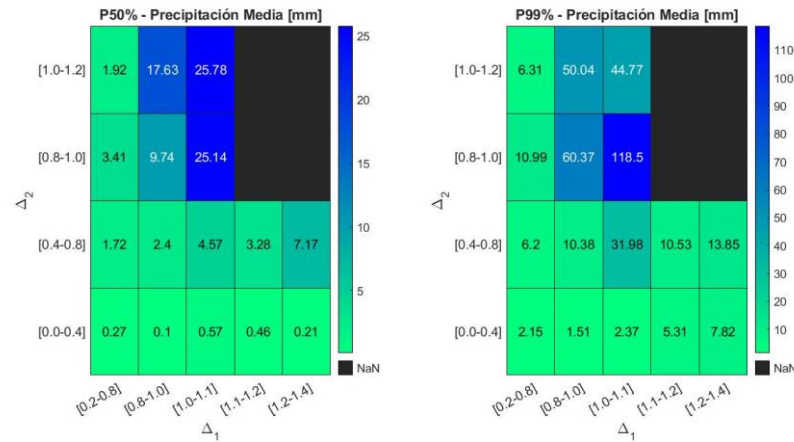
tormentas cuyos valores de  $\Delta_1$ - $\Delta_2$  se ubican en los intervalos [0.2-1.4] y [0-1.2], respectivamente, y que entregan un subconjunto de 790 tormentas. A partir de dicho subconjunto, se elaboraron mapas de calor que recogen las siguientes variables: nro. de tormentas (ver Figura 8), percentil 50% de la precipitación media – caudal observado, y el percentil 99% de la precipitación media – caudal observado (precipitación media en Figura 9 y caudal observado en Figura 10).

En cuanto al mapa de calor de nro. de tormentas vs los parámetros  $\Delta_1$ - $\Delta_2$ , se observa que existen dos regiones con la mayor frecuencia (en color rojo y naranja). La primera región (en color naranja) muestra 117 tormentas en los rangos [0.8-1.0] y [0.8-1.0] de los parámetros  $\Delta_1$ - $\Delta_2$ , respectivamente, que indica que un 14.81% de las tormentas analizadas se ubican muy cercanas al centroide de la cuenca, junto con una ligera distribución unimodal. La segunda región (en color rojo) tiene 184 tormentas en los rangos [1.2-1.4] y [0.0-0.4] de los parámetros  $\Delta_1$ - $\Delta_2$ , respectivamente, que muestra que un 23.29% de las tormentas analizadas se ubican en la parte alta de la cuenca, junto con una distribución unimodal significativa (concentradas espacialmente). Adicionalmente, es importante señalar que en las regiones vecinas a la primera región se concentran frecuentes episodios de tormentas, que reflejan la tendencia de las tormentas a adoptar una distribución espacial uniforme y a ubicarse en el centroide de la cuenca (Zocatelli et al., 2011).

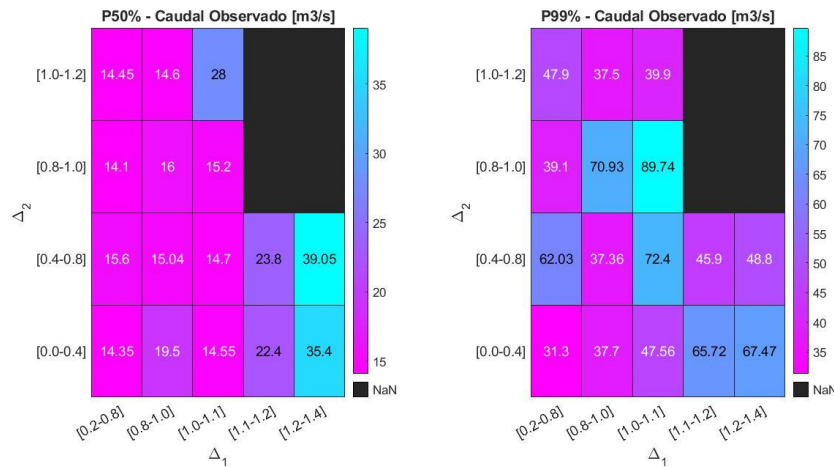
En relación a los mapas de calor del percentil 50% y el percentil 99% de las variables precipitación media y caudal observado de la estación “Río Colorado antes junta Río Maipo”, los mapas muestran que los valores más altos de dichas variables se encuentran en el rango [1.0-1.1] y [0.8-1.0] de los parámetros  $\Delta_1$ - $\Delta_2$  (ver región en color cian en P99% en la Figura 10). Esto significa que, el mayor impacto en la respuesta hidrológica se logra con tormentas ubicadas ligeramente aguas arriba del centroide de la cuenca, y con una leve distribución unimodal. La segunda región señalada en el párrafo anterior muestra bajos valores de precipitación media, pero con valores de escorrentía observada significativos. Esto se debe a que este grupo de tormentas ocurre en su mayoría en el período estival, donde el derretimiento de nieve aporta en mayor medida que la precipitación a la escorrentía total observada en la cuenca.



**Figura 8.-** Mapa de Calor – nro. de eventos de tormentas vs  $\Delta_1$ - $\Delta_2$

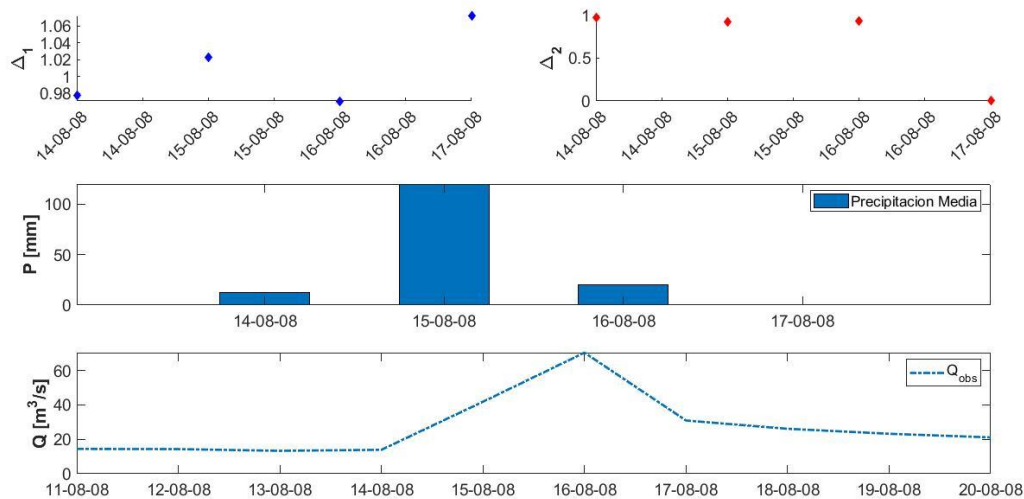


**Figura 9.-** Mapa de Calor – P50% & P99% de precipitación media vs  $\Delta_1$ - $\Delta_2$



**Figura 10.-** Mapa de Calor – P50% & P99% de caudal observado vs  $\Delta_1$ - $\Delta_2$

Los eventos de *tormentas de alto impacto* se definen como aquellas tormentas que conducen a un caudal igual o mayor al percentil 95% en la estación Río Colorado, y que corresponde a un valor de 50.7 m³/s. En la Figura 11 se muestra el evento de *tormenta de alto impacto* ocurrido el 15-08-2008, en donde se observa que la precipitación media diaria de la tormenta alcanza los 119.7 mm, junto con un caudal peak observado igual a 70.3 m³/s, además de presentar la información climatológica y de parámetros de momento espacial de tormentas de dicho evento. El parámetro de momento espacial  $\Delta_1$  se mantiene en el rango [0.97-1.02], que representa tormentas muy cercanas al centroide de la cuenca; mientras que el parámetro  $\Delta_2$  se encuentra en el intervalo [0.93-0.98], que indican tormentas ligeramente concentradas espacialmente a tormentas de distribución espacial uniforme. Si bien la tormenta presenta ligeras variaciones respecto del centroide de la cuenca, en el día de mayor precipitación la tormenta se ubica ligeramente aguas arriba del centroide, y que conduce a un rápido aumento del caudal observado en la cuenca. Cabe señalar que esta tormenta se encuentra dentro de la región con mayor impacto en la escorrentía, y que fue detectada en los mapas de calor expuestos previamente.



**Figura 11.-** Evento Extremo 15-08-2008 – Análisis de tormentas de alto impacto

## 6. CONCLUSIONES

El modelo TETIS requiere de una base de datos extensa, donde las forzantes meteorológicas son las más relevantes. En este sentido, el conjunto de datos CR2MET confirmó una base sólida de series temporales de precipitación y temperaturas medias, permitiendo contar con una grilla de 64 puntos para la cuenca de estudio. En cuanto a la información de entrada del modelo TETIS, es altamente recomendable promover la investigación para generar dicha información a nivel nacional, ya que sería una herramienta de gran utilidad para el estudio en cuencas naturales, y así fomentar el uso de modelos hidrológicos distribuidos.

El caudal observado vs simulado del Río Colorado presenta mejoras durante el proceso de calibración: el índice KGE adopta un valor de 0.78, con valores de las componentes  $r$  igual a 0.91, un valor de  $\alpha$  de 1.39, y un valor óptimo de  $\beta$  igual a 0.99 para la etapa de calibración. No obstante, en el período de validación el índice KGE disminuye a 0.56, debido a una disminución de todas las componentes  $r$ - $\alpha$ - $\beta$ . En cuanto al hidrograma obtenido en el período de calibración, para los eventos de tormentas de alto impacto se observaron caudales peak simulados menores a los observados: esto puede deberse a que las FO empleadas en el proceso de calibración se enfocan en optimizar toda la serie de datos, y no exclusivamente los peaks de escorrentía.

La determinación de los parámetros de momento espaciales permitió estudiar la organización espacial de los eventos de tormentas y comparar dicha propiedad con la información climatológica y fluviométrica de la cuenca. En este contexto, la elaboración de los mapas de calor según los rangos de los parámetros de momento espacial de tormentas contribuyó en la detección de la configuración espacial de tormentas con mayor impacto en la escorrentía observada, así como también las más frecuentes. En la cuenca de estudio, se encontró que las tormentas invernales que causan las mayores crecidas del período se ubican en la porción central de la cuenca, ligeramente sobre su centroide, junto con una leve distribución unimodal (dentro de este grupo se encuentra el evento de tormenta del día 15-08-2008).

## AGRADECIMIENTOS

La preparación de este manuscrito fue parcialmente financiada por el proyecto “Modelación hidrológica en la cuenca alta del río Aconcagua incorporando el impacto de la contaminación atmosférica sobre el manto nival cuantificada mediante datos in-situ”, Proyecto Interno USM Multidisciplinario, PI\_M\_2020\_58; y el proyecto Sistema integrado de monitoreo y modelo hidrológico-químico para la gestión de recursos hídricos aplicable a la prevención de desastres naturales y adaptación al cambio climático”, proyecto Fondef IDeA I+D, ID19I10359.

## REFERENCIAS

- Batjes, N.** (2005). SOTER-based soil parameter estimates for Latin America and the Caribbean. Version 1.0. ISRIC – World Soil Information, Wageningen.
- DGA.** (2017). “Actualización del Balance Hídrico Nacional”. Santiago, Chile.
- Douinot, A., Roux, H., Garambois, P.-A., Larnier, K., Labat, D., & Dartus, D.** (2016). “Accounting for rainfall systematic spatial variability in flash flood”. *Journal of Hydrology* 541, 359-370.
- GIHMA.** (2020). “Descripción del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS v.9”. U.P.V, Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente Valencia (IIAMA), Valencia, España.
- Hall, D., & Riggs, G.** (2021). “MODIS/Terra Snow Cover 8-Day L3 Global 500m SIN Grid”. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, Boulder, Colorado, USA.
- Jarvis, A., Guevara, E., Reuter, H. I., & Nelson, A. D.** (2008). “Hole-filled SRTM for the globe: version 4: data grid”. CGIAR Consortium for Spatial Information. <http://srtm.csi.cgiar.org/>
- Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Wang, X., Chen, Y., Bai, Y., Hernández, H. Jaime, Galleguillos, M., Estados, C., Biging, Gregory S., Radke, John D. & Gong, P.** (2016). “Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data”. *Remote Sensing of Environment* 183, 170-185.
- Zocatelli, D., Borga, M., Viglione, A., Chirico, G., & Blöschl, G.** (2011). “Spatial moments of catchment rainfall: rainfall spatial organisation, basin morphology, and flood response”. *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 3767–3783
- Zocatelli, D., Borga, M., Zanon, F., Antonescu, B., & Stancalie, G.** (2010). “Which rainfall spatial information for flash flood response modelling? A numerical investigation based on data from the Carpathian range, Romania”. *Journal of Hydrology* 394, 148–161.